

1. UVOD

U vrijeme velikog tržišnog natjecanja za što boljim i jeftinijim proizvodima, učinkovitost izrade uz što veće iskorištenje materijala nameće se kao osnovni zahtjev u proizvodnji.

Kod optimiranja proizvodnje veliku ulogu imaju inženjeri, koji uz dobro razumijevanje svih fizikalnih i mehaničkih procesa, moraju posjedovati i velika znanja u užem području svoga djelovanja.

Konstruktori se susreću, uz mnoge druge, s problemom odabira najpogodnijeg materijala koji će zadovoljiti sve zahtjeve postavljene u razvoju novog proizvoda. Potrebno je napraviti ravnotežu između cijene, mase proizvoda, vanjskog izgleda materijala s njegovim mehaničkim svojstvima.

Inovacije u konstrukcijskom oblikovanju proizvoda i u procesima proizvodnje bitno su određene svojstvima tehničkih materijala. Iskustva iz najrazvijenijih zemalja pokazuju da se primjenom novih materijala i pripadnih visokih tehnologija ostvaruju vrlo značajne prednosti na tržištu. Istraživanje, razvoj i primjena novih materijala te pripadnih tehnologija spada – uz genetiku i biotehnologiju, informatiku i komunikacije, u “generičke” discipline znanosti i tehnike.

Znanost i inženjerstvo materijala stvara vrlo velik broj inovacija, bitnih za niz drugih grana tehnike.

Za klasične metalne materijale razvija se nova tehnologija oblikovanja na gotovo konačan oblik injekcijsko prešanje metala (e. Metal Injection Molding - MIM).

Kod MIM-a, konačni proizvod je od čistog metala jer se polimer koristi samo kao vezivo da bi se metal mogao injekcijski prešati.

2. KOMPOZITI

2.1 Kompozitni materijali

Kompozit je oblikovan proizvod načinjen od kompozitnog materijala, npr lijevanjem, laminiranjem ili istiskivanjem. Kompozitni materijal je materijal koji se sastoji od kombinacije dva ili više jednostavnih (monolitnih) materijala i u kojem pojedine komponente zadržavaju svoj zaseban identitet.

Kompozitni materijal ima svojstva različita od svojstava njegovih komponenata. Kompozitni materijal ima također i heterogenu strukturu sastavljenu od dvaju ili više faza koje dolaze od njegovih komponenata. Sve faze mogu biti kontinuirane ili jedna ili više njih mogu biti disperzirane u neprekinutoj matrici.

U posljednjem slučaju potrebno je utvrditi donju granicu za veličinu čestice dispergirane faze ispod koje se smatra da je materijal monolitan. Obično se uzima veličina reda 10^{-8} m, jer je to približno donja granica u proizvodnji čestica. . Nadalje, područje od 10^{-9} - 10^{-8} m obično se uzima kao razdjelnica između pravih otopina i koloidnih disperzija. Različite vrste kompozita su ubrojene u tehnologiju polimernih materijala. Oni mogu biti sastavljeni od kombinacije polimer-polimer (polimerne mješavine) ili kombinacije polimer-plin (ekspandirani ćelijasti, ili pjenasti polimeri), ali najčešće su dvije vrste kombinacija polimer-čvrsto punilo, a to su kompoziti polimer-vlakno i polimer-čestice. Zadnjim dvjema vrstama želi se postići poboljšanje jednog ili više mehaničkih svojstava, tj. očvršćenje, dok jeftina punila uglavnom služe za punjenje volumena.

Za puni opis kompozitnog materijala treba poznavati ne samo sastav faza već i geometriju (oblik čestica, veličinu raspodjelu i orijentaciju čestica) i koncentraciju svake dispergirane faze. Koncentracija se često iskazuje kao volumni udio pojedine faze [1]. Od tri osnovne grupe kompozita s obzirom na matricu (kompoziti s polimernom, metalnom i keramičkom matricom), bit će govora samo o kompozitima s metalnom matricom (MMC-Metal Matrix Composites).

2.2. MMC- kompoziti s metalnom matricom

Kompoziti s metalnom matricom predmet su inženjerskog interesa, zato što su sposobni osigurati više uporabne temperaturne granice od njihovih osnovnih metala i mogu se oblikovati tako da se dobije povećana čvrstoća, krutost, toplinska vodljivost, abrazijska otpornost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost.

U MMC-u kontinuirana ili matrična faza je općenito legura, rjeđe čisti metal, a ojačalo se sastoji od visoko vrijednih ugljičnih, metalnih ili keramičkih dodataka. Tijekom proizvodnje kompozita miješaju se zajedno matrica i ojačalo.

Nasuprot polimernim kompozitima oni su nezapaljivi, ne otplinjavaju u vakumu i minimalno su osjetljivi na organske kapljevine kao što su goriva i otapala. Ojačala, kontinuirana ili diskontinuirana, mogu činiti 10 do 60 vol.% kompozita.

Kontinuirano vlakno ili vlaknasta ojačala uključuju ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor (B), aluminijski oksid (Al_2O_3) i metale visokog tališta.

Diskontinuirana ojačala sastoje se uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC, Al_2O_3 , titanova diborida (TiB_2) i kratkih nasjeckanih vlakana Al_2O_3 ili ugljika [2].

Najistaknutije karakteristike metalnih matrica vidljive su u različitim oblicima, posebice u tome što metalna matrica daje metalnu prirodu kompozitu u smislu toplinske i električne vodljivosti, proizvodnih procesa i interakcije s okolišem.

Dominirajuća mehanička svojstva matrice, kao modul elastičnosti i čvrstoća u poprečnom smjeru kompozita s usmjerenim ojačalima, dovoljno su visoka u nekim MMC-a da je moguće jednosmjerno slaganje u nekim inženjerskim konstrukcijama.

3. POSTUPCI PROIZVODNJE

Procesi proizvodnje MMC-a dijele se u sekundarne i primarne grupe. Primarni proces je postupak kojim se sintetiziraju kompoziti od osnovnih materijala, matrice i ojačala.

Pritom je uključena ugradnja ojačala u matricu u odgovarajućoj količini i na odgovarajuća mjesta i razvoj prikladnih veza između sastojaka.

Sekundarni proces se sastoji od svih dodatnih stupnjeva potrebnih za preradu primarnog kompozita u konačni dio.

U nekim slučajevima oba stupnja se odvijaju istodobno ovisno o željenom konačnom proizvodu i postupcima proizvodnje korištenim u procesu.

Izbor postupka za proizvodnju kompozitnog materijala ovisi o mehaničkim i kemijskim svojstvima ojačala i matrice; dužini i veličini vlakana, slaganju vlakana i željenom razmještanju vlakana; veličini, obliku i raspodjeli čestica.

Nadalje, potrebno je poznavanje termodinamike i kinetike mogućih reakcija matrica-ojačalo i radne temperature kojoj će kompoziti biti podvrgnuti.

Mnoga ojačala i materijali matrice nisu kompatibilni u smislu prijanjanja i takvi se materijali ne mogu preraditi u kompozite bez prilagodbe svojstava međupovršine među njima.

U nekih kompozita povezanost ojačala i metala je slaba i mora se pojačati. Kod kompozita proizvedenih od reaktivnih sastojaka treba izbjeći prekomjernu aktivnost na međugranici, koja može oslabiti svojstva materijala.

Taj problem obično se rješava ili površinskom obradom ili prevlakom ojačala ili prilagodbom sastava legure matrice.

3.1 Postupci u čvrstom stanju (e. Solid State Processing)

Ovi se postupci odvijaju pri nižoj temperaturi s mogućnošću bolje kontrole termodinamike i kinetike graničnih površina.

Dvije glavne grupe postupaka u čvrstom stanju su difuzijsko spajanje materijala u obliku tankih slojeva i srašćivanje.

Procesi nanošenja matrice, u kojima se materijal matrice nanosi na vlakno, uključuje elektrokemijsko prevlačenje, plazmeno naštrecavanje i fizikalno nanošenje iz parne faze.

Nakon procesa nanošenja, često je potreban sljedeći korak sjedinjavanja, kao npr. difuzijsko spajanje.

Difuzijsko spajanje odvija se pri povišenoj temperaturi i visokom tlaku. Međutim, stupanj difuzije mora biti ograničen, ili će na međupovršini doći do porasta neželjenih krhkih faza.

Jedan od načina ograničavanja vremena difuzije je istiskivanje sloja vlakana i matrice kroz alat.

Toplo valjanje može se također primijeniti, ali u tom slučaju deformacija se mora ograničiti da se smanji pomak vlakana ojačala i izbjegne oštećenje.

Povišene temperature se koriste da se olakša tečenje matrice, ali se mora izbjeći prekomjerno zagrijavanje koje bi moglo potaknuti kemijski napad na vlakna.

Nedostatak tih postupaka je što zahtijevaju vrlo čiste površine prije pokušaja spajanja.

To obično traži prethodno čišćenje sastavnih materijala i postupak u vakuumu. Ovim postupkom se sjedinjuju B/Al i Borsic/Al kompoziti [2 - 4].

Visokotemperaturna sinteza (e. Self-Propagating Synthesis – SHS)

Toplo prešanje (e. Hot Pressing, -HP) je proces s kojim se mogu proizvoditi kompoziti s malom poroznošću i trodimenzionalne strukture između intermetalnih spojeva i metalnih matrica s konkurentnom cijenom i jednostavnošću.

Na taj se način mogu proizvesti npr. metalni kompoziti $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$.

Kao polazna sirovina koriste se prah aluminija i titanova oksida (TiO_2).

Nazočnost aluminija je najbolji način za popunjavanje pora.

U toj reakciji višak aluminija služi za kontrolu poroznosti kompozita i olakšanje procesa sinteze.

Dio metala se potroši u reakciji za stvaranje intermetalnog spoja a ostatak, koji je tekuć, popunjava pore u matrici za vrijeme srašćivanja i povećava gustoću kompozita.

Istovremena uporaba tlaka i reakcija sinteze omogućuju smanjenje poroznosti proizvedenog materijala reakcijama sinteze i kontrolu geometrije pora kao i ravnomjernu raspodjelu čestica AlTi_3 u metalnoj matrici [5, 6].

Metalurgija praha (e. Powder Metallurgy – PM)

Ostvaruje se povezivanje praha s česticama, pločicama ili viskerima ojačala nizom koraka.

Dva ili više odijeljena praha se miješaju, katkad uz pomoć veziva. Keramičke čestice koje trebaju osigurati visoku čvrstoću kompozita su reda veličine 5 μm u promjeru, dok je veličina praha legure matrice (aluminij ili magnezij) od 20 do 40 μm u promjeru.

Razlika u veličini čestica praha omogućuje stvaranje neprekinute mreže malih keramičkih čestica oko većih zrna matrice.

Tako nastaju mikrostrukturno nehomogena područja. Nadalje, stvaranjem mreže nastala poroznost mora se popuniti rastaljenom legurom matrice tijekom sjedinjenja (toplo prešanje).

Ako polazni prah lako oksidira, vrlo fini submikronski oksidi mogu se koncentrirati na granicama zrna značajno smanjujući lomnu žilavost izvornog materijala. Dijelovi postupka uključuju:

- prosijavanje brzo očvršćenih čestica
- spajanje čestica s fazom ili fazama za ojačavanje sa ili bez veziva,
- zgušćivanje smjese ojačala i matrice na 75 % gustoće,
- otplinjavanje i završno sjedinjenje istiskivanjem, kovanjem, valjanjem ili nekom drugom toplom obradom.

MMC-i proizvedeni PM tehnologijom obilježeni su visokom cijenom i značajnim svojstvima kao što su čvrstoća i krutost [4].

3.2 Postupci u kapljevitom stanju (e. Liquid Processing)

Za što bolje povezivanje matrice i vlakana poželjno je da taljevina iz matrice teče u među prostore nerazvrstanog vlakna da bi se osiguralo potpuno pokrivanje vlakna. Za takav postupak koriste se duboke kupke koje značajno olakšavaju proizvodnju, a koje se upotrebljavaju u industriji za pripremu predoblika. Različitost između potrebe ovlaživanja vlakana i izbjegavanje prevlake kemijske reakcije između vlakana i matrice uvjetuje predobradu istih, i to prevlačenjem kao npr. sa spojem titanovog diborida u slučaju aluminijskih MMC-a. Vlakna s prevlakom provlače se zatim kroz kupku rastaljenog aluminija u kontinuiranom postupku. Prodiranje rastaljenog aluminija između vlakana osigurava razdvajanje vlakana jednako dobro kao i vezu međupovršinu između vlakana i matrice. Prevlaka na vlaknu, kao što je titanov diborid, pomaže ovlaživanje i zaštitu vlakana od kemijske reakcije pri povišenim temperaturama. Aluminijski kompoziti u velikoj mjeri proizvode se sa česticama kao ojačalom. Istražuju se i već primjenjuju različiti postupci.

Lijevanje u kalup najčešći je od svih ljevačkih postupaka za proizvodnju velike količine dijelova uz najnižu cijenu. Pritom se koriste različiti načini pripreme taljevine i tehnike lijevanja [7].

Lijevanje miješanjem (Stir Casting) slično je klasičnom postupku kod aluminijskih legura, ali uz blago miješanje taljevine radi osiguranja ravnomjerne raspodjele npr. SiC čestica. Stalna kontrola temperature taljevine potrebna je radi izbjegavanja pregrijanja i naknadnog stvaranja karbida.

Lijevanjem tiskanjem (Squeeze Casting) uključuje ulaganje poroznog keramičkog predoblika u predgrijani kalup, koji će se kasnije ispuniti kapljevitim metalom. Pomoću tlaka rastaljeni metal ulazi u keramički predoblik i nastaje čvrst kompozit. Postupak smanjuje utrošak materijala i energije, proizvodeći dijelove na konačnu mjeru i nudi sposobnost selektivnog ojačavanja.

Lijevanje u polučvrstom stanju (Compocasting, Rheocasting) je postupak sličan lijevanju miješanjem, s razlikom što se čestice dodatka miješaju u metal koji je u polučvrstom stanju. Polučvrsti metal mora se snažno miješati, a ne blago kao kod lijevanja miješanjem.

Bestlačna infiltracija metala (e. Pressureless Metal Infiltration)

Postupak je vlasništvo AM LANXIDE-a, poznat pod različitim zaštićenim imenima. Prvim razvijenim postupkom kompoziti se proizvode infiltracijom sloja čestica Al_2O_3 rastaljenim metalom koji je izložen oksidacijskoj atmosferi.

Materijal matrice nastalog kompozita je sastavljen od smjese produkata oksidacijske reakcije i neizreagirane aluminijske legure (LANXIDE). Ovaj postupak omogućuje dobivanje gotovih oblika i svojstava kompozita koja mogu zadovoljiti primjerene specifične namjene.

Novijim postupkom PRIMEX CONCENTRATE proizvodi se materijal koji se kasnije može pretaljivati i koristiti u ljevaonicama za proizvodnju dijelova od aluminijskog MMC-a. Postupak uključuje bestlačnu infiltraciju aluminijske u masu keramičkih čestica za ojačanje, (slika 3.1).

Ta infiltracija je praćena *in situ* stvaranjem jedinstvene površinske prevlake na česticama ojačala. Prevlaka omogućuje potpuno vlaženje čestica i povoljne značajke za tečenje taljevine, važna obilježja za daljnu ljevaoničku uporabu.

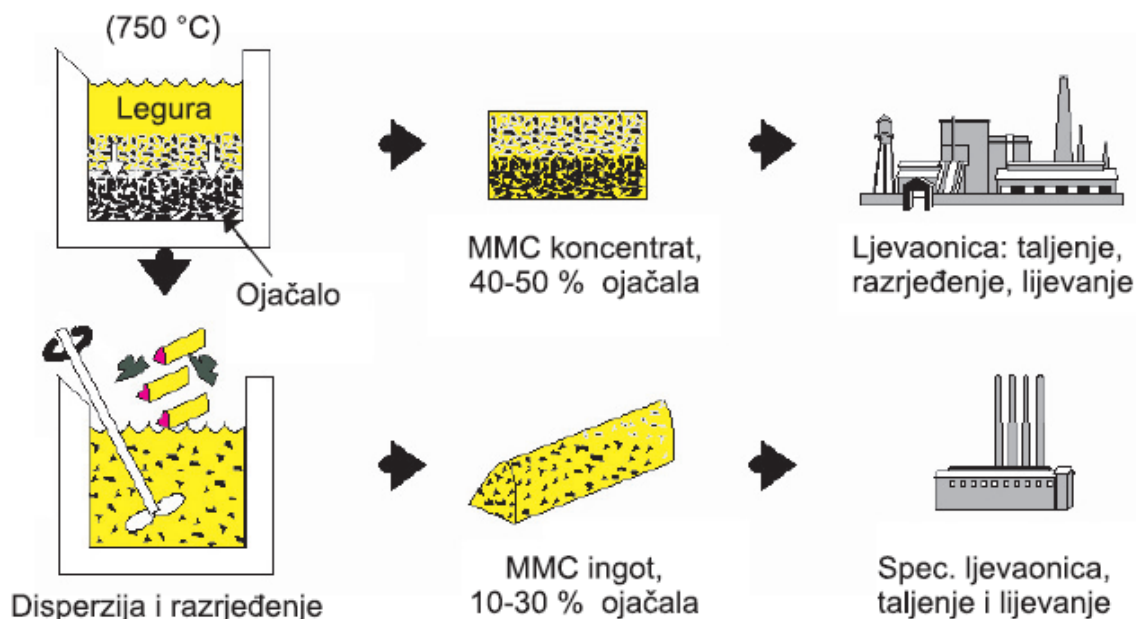
Izostanak ovlaživanja može inače uzrokovati podebljanje i nestabilnost u taljevini koja sadrži čestice bez prevlake. Kod taljevina s PRIMEX CONCENTRATE materijalom stabilna viskoznost ostaje i tjednima kod normalne temperature lijevanja.

Na stabilnost ne utječu neočekivani toplinski ispadi koji se mogu dogoditi tijekom uporabe. Recikliranje uljevnog sustava i pojila u taljevinu, ako je vješto obavljeno, nema štetan utjecaj na dinamičku izdržljivost i kvalitetu proizvoda.

Tipičan udio ojačala u koncentratu je 40 do 50 % po volumenu, a ostatak je aluminijska legura matrice. Koncentrat je pripremljen za masovnu ljevaoničku uporabu. Ljevaonice koje koriste ovakav koncentrat mogu ga same razrijediti jeftinim aluminijem. Razrijeđen kompozit pripremljen za lijevanje obično sadrži 10 do 30 % keramičkih čestica po volumenu, ovisno o zahtijevanim svojstvima i primijenjenom postupku lijevanja. Tako dobivena taljevina je jednolika i stabilna. Objema tehnologijama ojačalo, legura matrice i mikrostruktura kompozita se mogu varirati i potpuno kontrolirati, što omogućuje pripremu dijelova za određenu primjenu. Mogu

se ekonomično proizvoditi dijelovi završnog ili gotovo završnog oblika, svih veličina i složenih oblika. Primjera kvalitetni kočnički diskovi za automobile proizvode se sa do 75 % recikliranog materijala dobivenog ovim postupkom [7, 8].

Ove tehnologije zajedno s tehnologijama za proizvodnju dijelova od kompozita s keramičkom matricom su zaštićene nizom patenata. U svijetu postoji više od 2700 patenata s tog područja.



Slika 3.1 Proizvodnja MMC-a PRIMEX bestlačnom infiltracijom [8].

Značajna primjena postupka bestlačne infiltracije metala je u proizvodnji dijelova za pakiranje, podloge i pomoćne strukture za elektroničke komponente od SiCp/Al kompozita (slika 3.1). Pritom su tipični zahtjevi: mali koeficijent toplinskog rastezanja (α) da bi se smanjila mehanička naprezanja usmjerena na elektronički uređaj tijekom sklapanja ili rada, visoka toplinska vodljivost radi smanjenja iskrivljenja i mala gustoća za minimalnu težinu. U usporedbi s klasičnim aluminijskim legurama, kompoziti imaju, zbog oblika i udjela čestica SiC znatno smanjen koeficijent toplinskog rastezanja, (α) i veći modul elastičnosti, s malo ili bez utjecaja na toplinsku vodljivost i gustoću. Zbog mogućnosti projektiranja fizikalnih i toplinskih svojstava, postupak bestlačne infiltracije metala pruža i više drugih prednosti u

smanjenju cijene i/ili povećanju pouzdanosti u odnosu na klasične metode izrade elektroničkih komponenti:

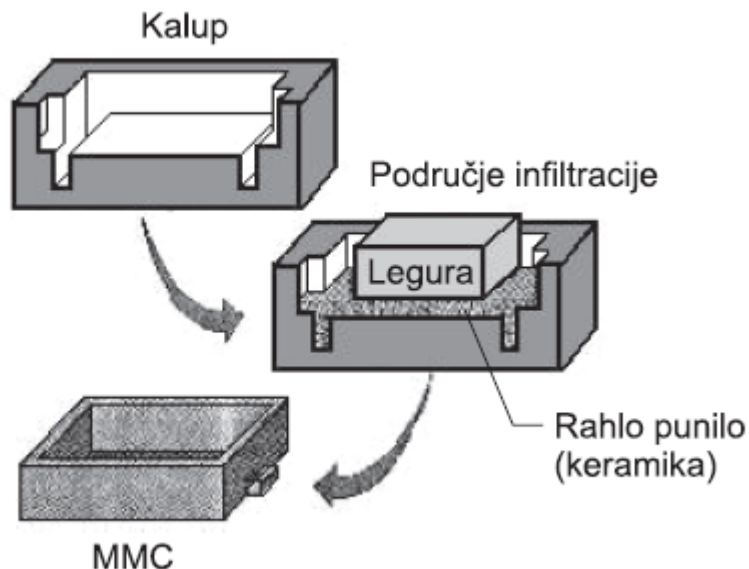
- sposobnost izrade složenih dijelova na završni ili gotovi završni oblik,
- oblikovanje rubova kućišta za zatvaranje laserskim snopom ili otpornim zavarivanjem,
- kompatibilnost sa prevlakama zlata, kositra ili nikla i
- mogućnost *in situ* povezivanja električnih kanala, čime se izbjegavaju pogreške zbog lemljenih spojeva [9].

Specifična krutost (modul elastičnosti podijeljen s gustoćom) SiC/Al kompozita može biti više od 3,2 puta veća od one neočvrsnutog čelika, aluminijevih i titanovih legura.

Ta svojstva, povezana s kontroliranom toplinskom vodljivošću i malim (α), čine MMC-e atraktivnim za komponente koje zahtijevaju izvanrednu krutost i dimenzijsku stabilnost kao što su, automobilske kočnice, i komponente optičkih sustava.

Aluminijski metalni kompoziti ojačani krupnijim česticama SiC pokazuju izvanrednu otpornost na eroziju suspenzijama, a oni s česticama Al_2O_3 su potencijalni materijal za primjenu u proizvodima gdje se traži viša čvrstoća i žilavost.

Kompoziti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ su krući i čvršći od neočvrsnute izvorne legure i zadržavaju dobru lomnu žilavost unatoč manjoj duktilnosti (slika 3.2).



Slika 3.2. Shema proizvodnje elektroničkog elementa bestlačnom infiltracijom [9]

Nanošenjem naštrcavanjem (e. Spray Deposition)

Postupak uključuje atomizaciju taljevine (stvaranje zasebnih kapljica), naštrcavanje kapljica rastaljenog metala kroz sapnice i skupljanje i zgušnjavanje polučvrstih kapljica na podlozi.

U postupku naštrcavanja metalna legura se tali indukcijskim grijanjem i izlijeva u zagrijanu posudu. Taljevina teče kroz izlaz na dnu prema plinskom raspršivaču.

Plinski mlaz velike brzine rastavlja metal u sitne kapljice koje se snažno ubrzavaju prema podlozi. Na podlozi kapljice se zgušnjavaju i stvaraju talog oblikujući tako izravno približno konačne oblike, za razliku od postupka metalurgije praha gdje se postupak odvija u međustupnjevima.

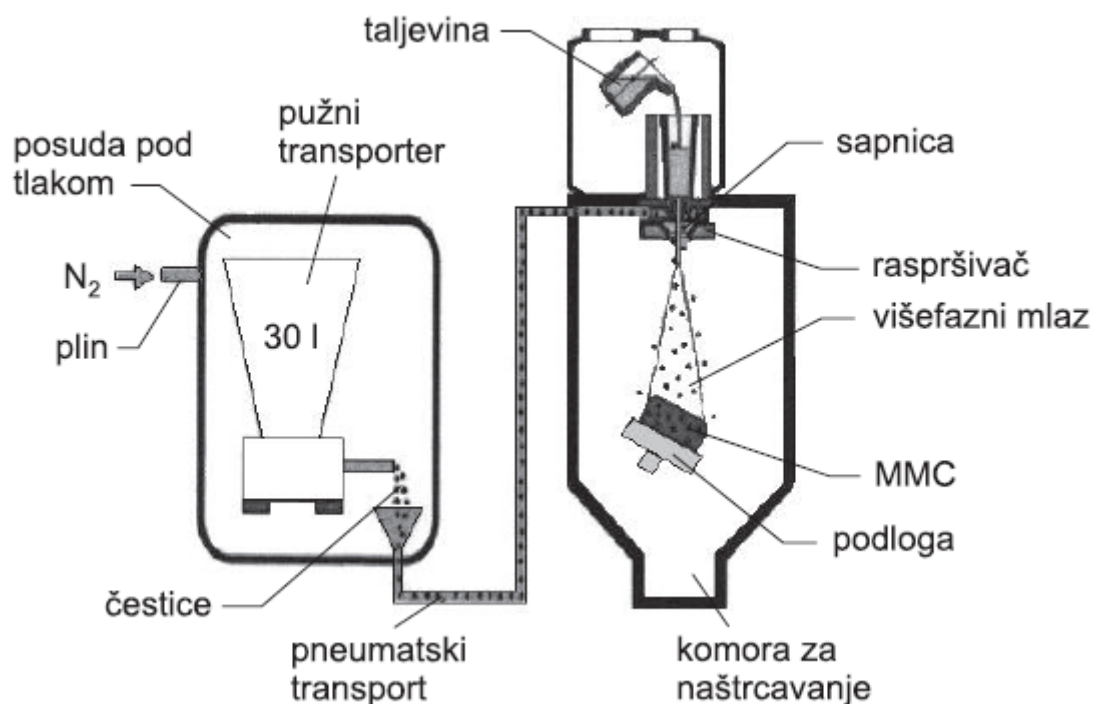
Brzina očvršćivanja nije tako velika kao kod brzog očvršćivanja i ima dvije prednosti: izravna proizvodnja prethodnih oblika i izravno uključivanje ojačala u pripadnu matricu.

MMC ingoti se lijevuju uvođenjem čestica za očvršćenje (ugljik, Al_2O_3 , SiC) u metalni mlaz. Potrebna je pažljiva kontrola uvjeta doziranja da bi se osigurala ravnomjerna raspodjela čestica.

Na (slici 3.3) shematski je prikazan uređaj za naštrcavanje [10]. Miješanje i zgušnjavanje dviju komponenata ovim načinom naziva se oblikovanje naštrcavanjem kompozita s metalnom matricom.

Materijal ima metalnu matricu u kojoj u dispergirane druge komponente u obliku čestica. Kvaliteta materijala se može prilagoditi potrebama primjene, kao npr. od krhkog do žilavog, vrstom, udjelom, oblikom i raspodjelom čestica ojačala.

Glavna namjena proizvodnje MMC-a je poboljšanje otpornosti na trošenje, osobito abrazijsko, otpornosti na povišene temperature i poboljšanje modula elastičnosti, posebno aluminijevih i bakrenih legura, a u posljednje vrijeme i superlegura. Jedan od takvih komercijalnih postupaka je Ospery postupak.



Slika 3.3. Shema postupka naštrcavanja [10]

Brzo očvršćivanje (e. Rapid-Solidification Processing - RPS)

Na veličinu zrna kompozita dobivenih ingot tehnologijom može utjecati udaljenost između čestica, ako je porast zrna sputavan sudaranjem čestica.

Kod metala osjetljivih na porast zrna kao što je magnezij, konačna veličina zrna katkad je prevelika, što pogoršava mehanička svojstva.

Zbog toga se pri razvoju niza inženjerskih legura koristio postupak brzog očvršćivanja za postizanje mikrostrukture koja poboljšava visokotemperaturna svojstva kao npr. čvrstoću i otpornost na koroziju.

Mikrostruktura ovih legura ističe se ujednačenijim sastavom, usitnjenim mikrosastojcima, visokim stupnjem prezasićenosti, i zadržanim metastabilnim fazama.

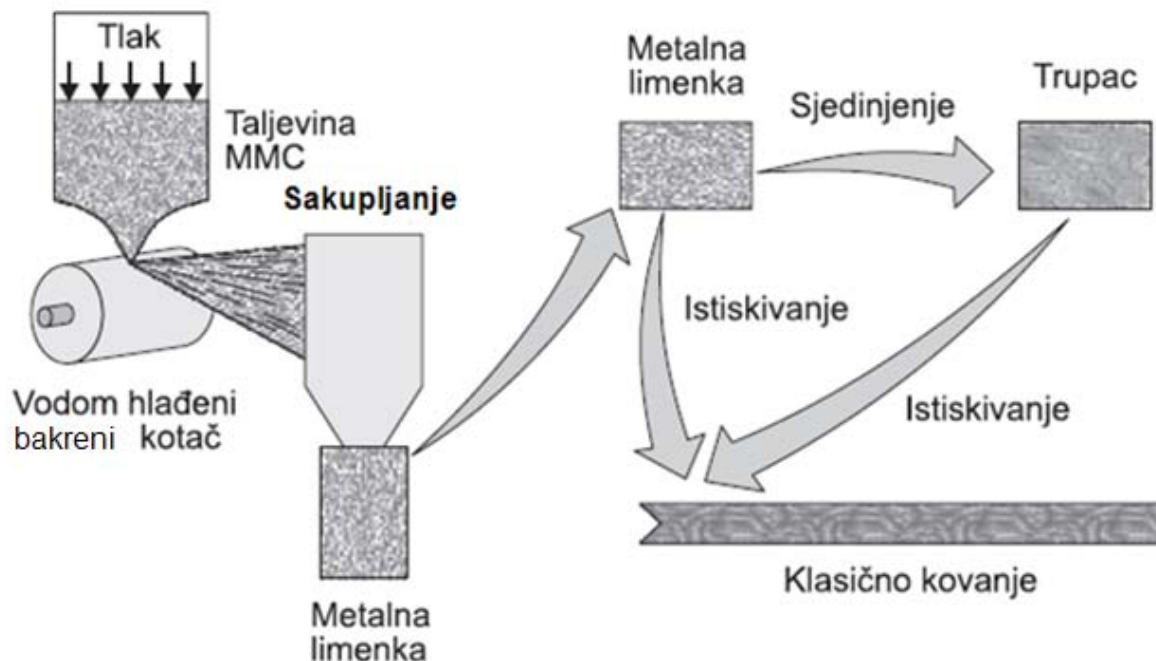
Snažno usitnjenje lijevane dendritne strukture postignuto je povećanjem brzine hlađenja ili brzine rasta dendrita tijekom očvršćivanja.

Povećana ujednačenost sastava postignuta je kraćim difuzijskim putem između područja mikrosegregacija. Nadalje, precipitati nastali u tim područjima teže smanjenju veličine i jednoličnoj raspodjeli.

Primjena postupka brzog očvršćivanja kod proizvodnje metalnih kompozita s keramičkim ojačalima dopušta uporabu visokočvrstih, visokotemperaturnih legura kao materijala matrice.

To omogućuje optimiranje svojstava matrične faze i uporabu velikih čestica ojačala za povećanje lomne žilavosti bez gubitka na čvrstoći.

Tri su načina korištenja brzog očvršćivanja u proizvodnji kompozita: atomizacija, dobivanje traka (e. melt-spun ribbon) i listića (e. meltspun flake).



Slika 3.4. Postupak brzog očvršćivanja (RSP) [11]

Ovaj posljednji način je najperspektivniji jer dovoljno velika brzina očvršćivanja omogućuje dobivanje listića debljine oko 40-60 μm . Listići dobiveni ovim načinom široki su i dugački 6 do 8 mm i imaju mali omjer površina/volumen.

Listići se mogu izravno sjediniti u kompozitni proizvod bez daljnje promjene veličine. Trake, nasuprot tomu, zahtijevaju daljnu obradu radi smanjenja njihove veličine, što može dovesti do onečišćenja i oksidacije.

Pri atomizaciji velika brzina očvršćivanja se može postići ako su atomizirane čestice vrlo male. Nažalost, velika površina malih čestica rezultira velikim udjelom površinskih oksida, koji su štetni za duktilnost i lomnu žilavost sjedinjenog materijala.

Potencijalna prednost proizvodnje listića je smanjenje cijene u odnosu na uobičajeni postupak metalurgije praha, PM. Npr. potrebno miješanje prahova kod PM postupka izostaje pri proizvodnji listića i za završno stapanje mogu se koristiti uobičajeni postupci oblikovanja metala kao što je istiskivanje.

Nadalje, izostaje za PM postupak potrebno dulje vrijeme i zahtjevna oprema kao što je oprema za toplo prešanje u vakuumu. Dobivanje visoko kvalitetnog metalnog praha postupkom atomizacije zamijenjeno je predlegiranim MMC uz znatnu uštedu u cijeni polaznog materijala. Dva su kritična parametra postupka za dobivanje listića:

brzina kola za gašenje i količina rastaljenog metala koja pada na kolo. Brzina kola, određena prijanjanjem rastaljenog materijala na bakreno kolo, utječe na brzinu očvršćivanja. Ako se kolo okreće prebrzo, rastaljeni metal neće dovoljno dugo biti u dodiru s kolom da se dobiju listići.

Ako je okretanje presporo, listići će biti neprihvatljivo debeli. Količina materijala koja udara u kolo je određena promjerom otvora i tlakom primijenjenim na posudu unutar komore za taljenje.

Optimalni tlak je onaj koji osigurava ravnomjernu struju metala na kolo. Primjerice za SiC/Mg kompozitnu taljevinu optimalan je tlak otprilike 27 kPa uz uporabu promjera otvora od 1,3 mm. Uz te parametre keramičke čestice SiC su ravnomjerno raspoređene unutar gašenih listića [11].

Fizikalno prevlačenje iz parne faze (e. Physical Vapour Deposition - PVD)

Postupak obuhvaća niz postupaka uključujući isparavanje elektronskim snopom.

Magnetronsko taloženje i elektro-prevlačenje su postupci kojima se proizvode kompoziti uzastopnim nanošenjem slojeva matrice na vlakna ojačala.

PVD tehnike zahtijevaju puno manje zagrijavanja vlakna od infiltracije rastaljenim metalom.

Temperature površine su obično ispod 200 °C. Ta se tehnika uvelike koristi za proizvodnju C/Al-kompozita [4].

4. INJEKCIJSKO PREŠANJE METALA – (e. Metal Injection Moulding - MIM)

Uspoređujući svojstva proizvoda izrađenim MIM postupkom, sa proizvodom izrađenim postupkom lijevanjem ili kovanja, MIM postupak je idealan za malu proizvodnju složenih dijelova s odličnim mehaničkim svojstvima.

Injekcijsko prešanje metala (MIM) se u proteklom desetljeću etabliralo kao konkurentna proizvodnja za male i precizne proizvode, koje bi bili skupi za proizvodnju alternativnim metodama.

Injekcijsko prešanje metala (MIM) sjedinjuje strukturne prednosti metalnih materijala sa složenošću oblika koji se postiže injekcijskim prešanjem polimera. Mješavina praha i veziva koja se ubrizgava u kalup mora biti homogena. Prahovi za MIM su sferičnog oblika i mnogo sitniji od onih za konvencionalno sabijanje u hladnom ukovnju (MIM prašak: 10 do 20 μm ; konvencionalni prahovi: 50 do 150 μm). Praškasti materijali dobivaju se postupkom poznatim pod imenom metalurgija praha (engl. powder metallurgy, njem. pulvermetallurgie, skraćeno PM).

Metalurgija praha je tehnološki postupak s pomoću kojeg se proizvode čvrsta metalna tijela (proizvodi) sjedinjavanjem čestica praška jednog ili više metala.

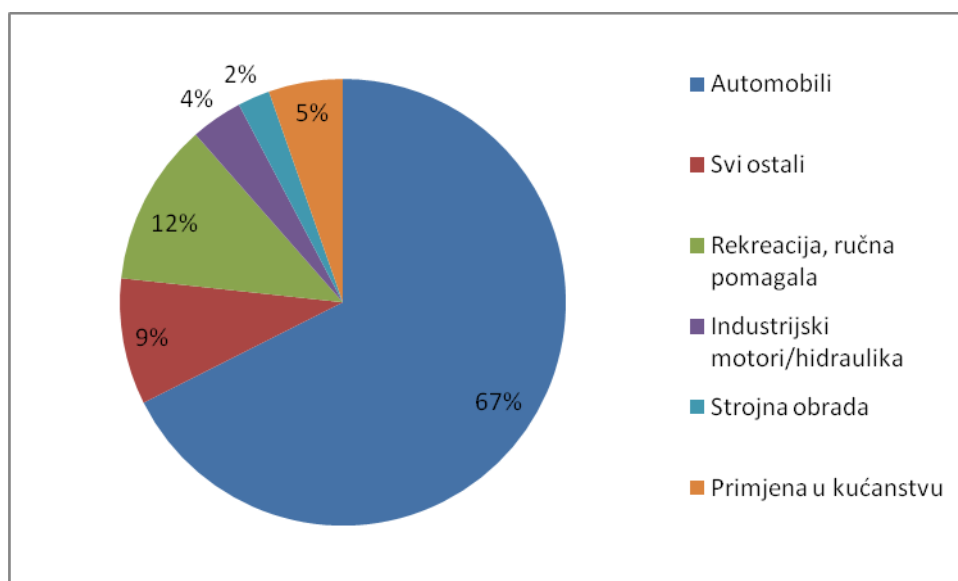
Prednost PM je mogućnost tog postupka da proizvede visoko kvalitetne, složene strojne dijelove s visokom dimenzijskom točnošću na ekonomičan način.

PM pretvara čestice praška specifične veličine i oblika u čvrste, precizne i visoko kvalitetne proizvode.

U razvoju tih materijala nastoje se ukloniti dva osnovna nedostatka PM postupka:

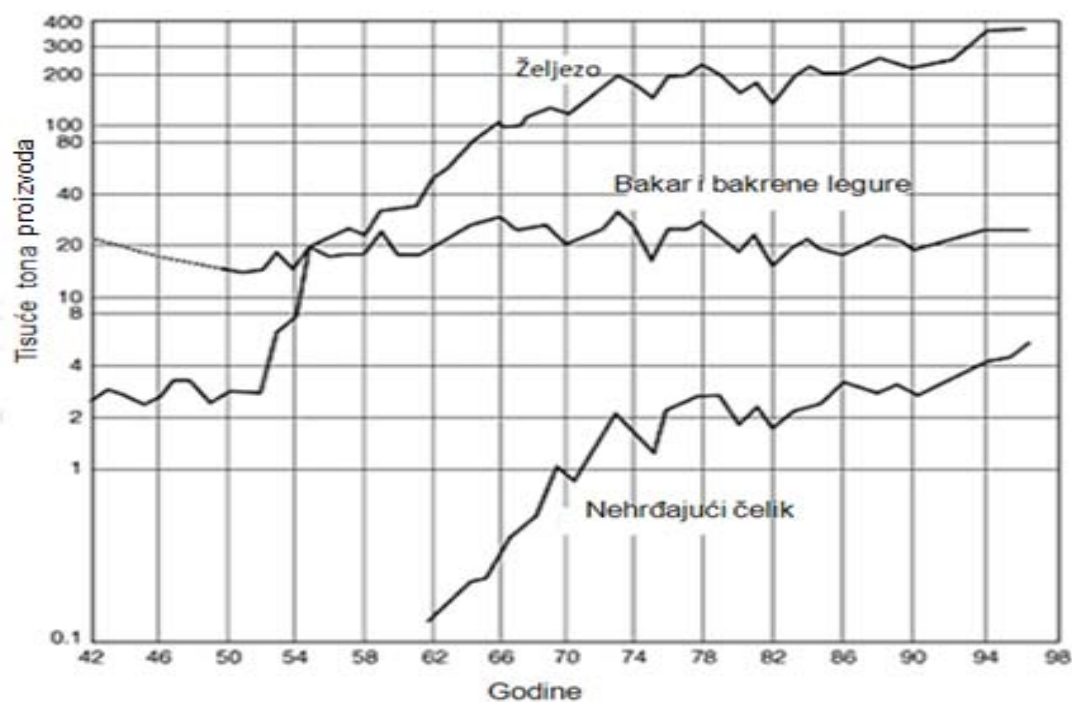
- relativno visoka cijena proizvoda dobivenih metalurgijom praha
- slabija uporabna svojstva uslijed poroznosti dijelova

Unatoč tim nedostacima ovaj postupak ima vrlo veliku primjenu u automobilske industriji na koju otpada između 60 i 70% ukupne PM proizvodnje.



Slika 4.1. Proizvodnja PM proizvoda po industrijskim granama u SAD & Kanadi 1995.

[12]



Slika 4.2. Proizvodnja PM proizvoda prema vrsti materijala u SAD & Kanadi [12]

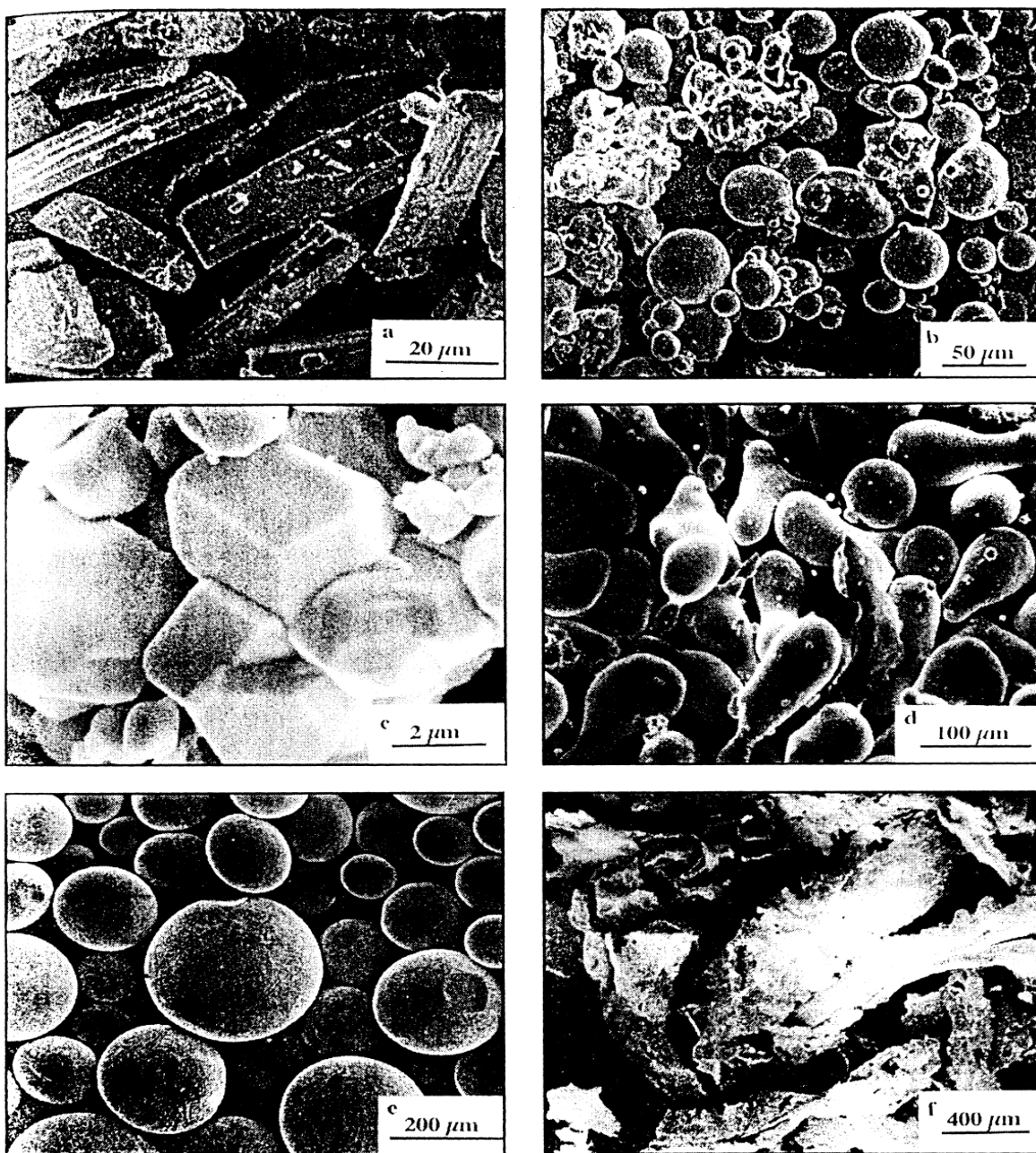
Proizvodnja PM proizvoda sastoji se od:

- proizvodnje praha (atomizacija)
- prešanja
- srašćivanja

Osim atomizacijom (daleko najveći udio u proizvodnji) prah se proizvodi i :

- kemijskim postupcima
- elektrolizom

Čestica praha je definirana kao najmanja više nedjeljiva jedinica. Općenito u PM koriste se čestice veće od čestica čađa (0,01 do 1 μm), ali manje od zrnaca pijeska (0,1 do 3 mm). Mnogi metalni prahovi su dimenzija sličnih promjeru ljudske kose (25 do 200 μm).



Slika 4.3. Veličine čestica praha [12]

Injekcijsko prešanje praha je postupak poznat je pod kraticom PIM (e. Powder Injection Molding).

Kod ovog postupka sjedinjene su prednosti različitih tehnologija.

Od klasične PM preuzeta je mogućnost višestrukog legiranja miješanjem i prešanjem najrazličitijih prašaka kao i mogućnost proizvodnje dijelova od nelivljivih ili visokotaljivih metala i njihovih slitina.

Od prerade polimera koristi se mogućnost izrade proizvoda složenog oblika ovim postupkom.

Injekcijsko prešanje metala je proizvodni proces koji uključuje doziranje metalnih ili keramičkih prahova, oni se ponašaju kao plastika tako da se miješaju sa polimernim vezivom stvarajući sirovinu.

Kad je izradak izbačen iz kalupa, vezivni materijal se uklanja ili otapanjem i ekstrakcijom ili/i toplinskim procesom a zatim se otpresak srašćuje. Uslijed velike količine veziva u početnom materijalu (do 40 % volumena), MIM otpresak je podvrgnut velikom smanjenju volumena (čak do 20 % linearnog skupljanja) tijekom srašćivanja.

Dimenzijske tolerancije stoga nisu tako dobre kao kod konvencionalnih postupaka kovanja u ukovnju. Složene i geometrijski zahtjevne komponente kojima je proizvodnja u prošlosti bila dugotrajna i skupa znatno je uznapredovala novim postupkom koji se zove MIM-a, takvim načinom postignuta je lakša i jeftinija proizvodnja.

Detaljne mogućnosti kao što su utori, zupci, unutarnje i vanjske oznake, tekstualni i grafički simboli mogu biti oblikovani u kalupu, eliminirajući potrebu za skupim sekundarnim operacijama.

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, smanjuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50%.

Opće karakteristike MIM-a jesu:

- ograničen broj materijala koji se može prešati -niskolegirani i nehrđajući čelici, legure za meke magnete, mjedi, bronce, WC, ~čisti Ni, legure za elektrotehniku (Invar i Kovar) te W-Cu kompoziti;
- postupak je ograničen na relativno male proizvode vrlo složenog oblika za srednje do velike količine;
- skuplji je od konvencionalnih postupaka
- problem je izbor vezivnog sredstva

U tablici 4.1. uspoređeni su konkurentni postupci preciznog lijeva i MIM-a.

Tablica 4.1. Usporedba mogućnosti oblikovanja između MIM i preciznog lijeva [13]

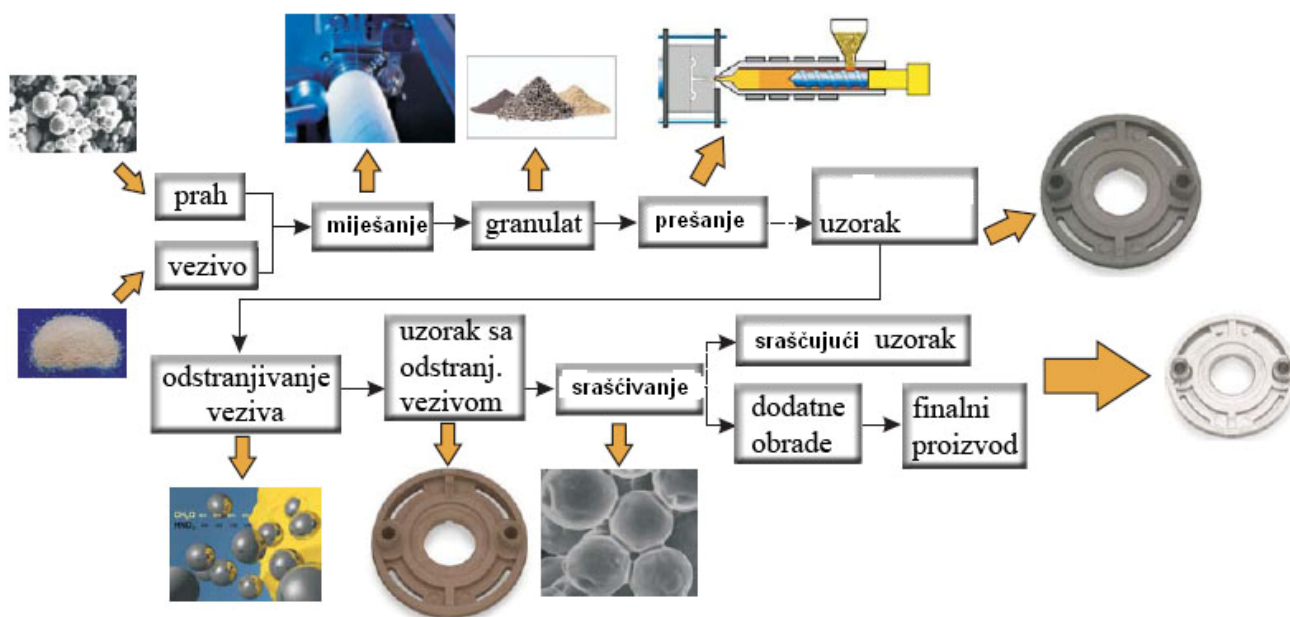
Karakteristika	Precizni lijev	MIM
Minimalni promjer provrta, mm	2	0,4
Minimalni dubina sljepog provrta, mm	2	20
Minimalna debljina stijenke, mm	2	<1
Maksimalna debljina stijenke, mm	neograničena	5
Tolerancija kod dimenzija 14 mm	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,06$ mm
Hrapavost površine Ra, μm	5	4

5. NAČELO RADA MIM POSTUPKA

Na slici 5.1. je prikazan redoslijed operacija MIM tehnologije. Proces se sastoji od četiri glavna koraka:

- priprema granulata
- ubrizgavanje
- odstranjivanje veziva i
- srašćivanje.

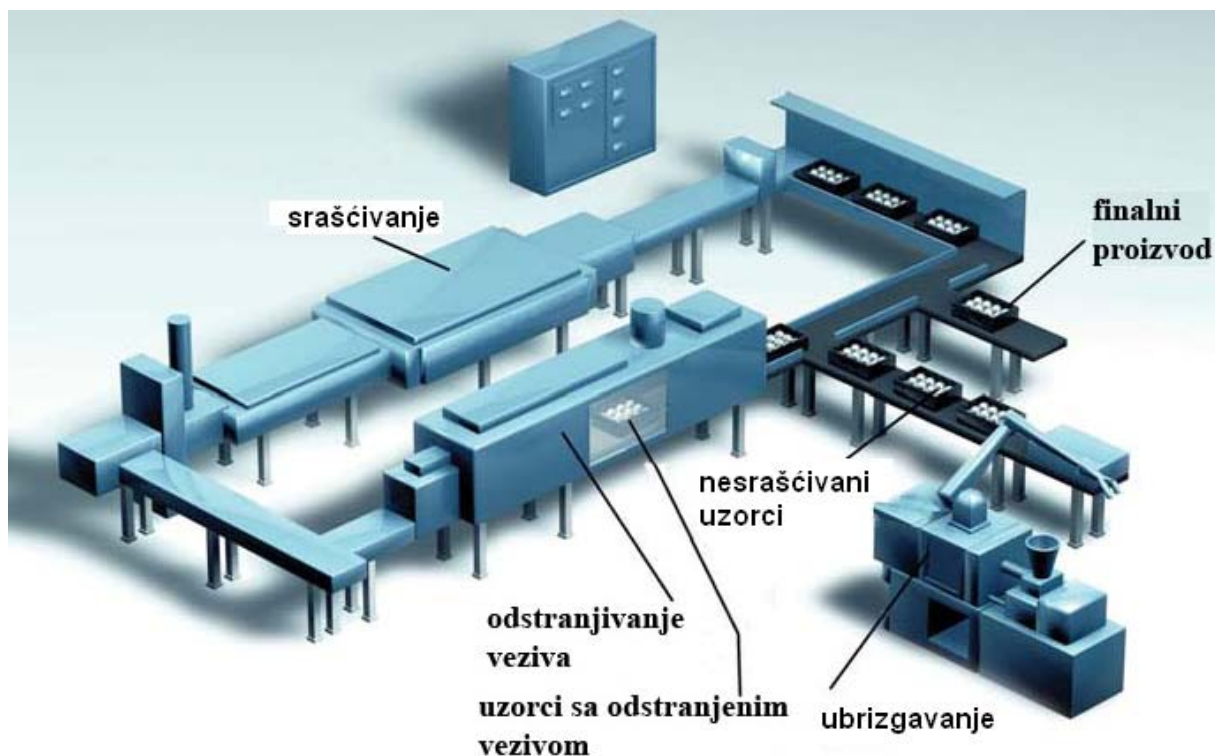
U fazi pripreme granulata se ide od finih metalnih prahova koji se mešaju sa termoplastičnim vezivom oblikujući homogeni granulat. Termoplastično vezivo



Slika 5.1. Redoslijed operacija MIM tehnologije [14]

održava metalni prah u plastičnom stanju za vrijeme procesa ubrizgavanja. Kao rezultat ubrizgavanja dobiva se nesrašćujući uzorak (engl. green body) koji se zatim podvrgavaju procesu odstranjivanja veziva. Uzorak sa odstranjenim vezivom (engl. brown body) se potom srašćuje. Srašćujući uzorak je moguće dodatno toplinski ili mehanički površinski obraditi ali to najčešće nije neophodno. Površina uzorka se

može obraditi pjeskiranjem, poliranjem ili brušenjem ukoliko je to neophodno. Na slici 5.2 je prikazan primjer automatizirane linije za injekcijsko prešanje metalnih prahova



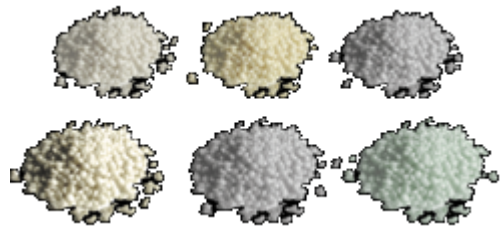
Slika 5.2. Automatizirana linija za injekcijsko prešanje metalnih prahova [15]

Postupak injekcijskog prešanja metalnih kompozita mješanjem organskih veziva i metalnih prahova je sličan postupku injekcijskog prešanja plastike.

Mješanjem metalnih ili keramičkih prahova (slika 5.3) sa organskim vezivima, „recept“ u procesu proizvodnje je ključni korak da se osigura kvalitetan proizvod. Kako bi se osigurala pogodna smjesa da odgovara završnim zahtjevima i tolerancijama proizvoda, postoji metalurgija koja stvara organska vlakna koja bi omogućila najpogodniji proizvod.



Slika 5.3. Čestice praha [16]



Slika 5.4 Organska veziva [16]

Sustav organskih veziva (slika 5.4) omogućuje metalnom ili keramičkom prahu da se ponaša poput plastičnih. Nakon oblikovanja, veziva se lako uklanjaju. Ona nemaju štetan utjecaj na konačan proizvod.

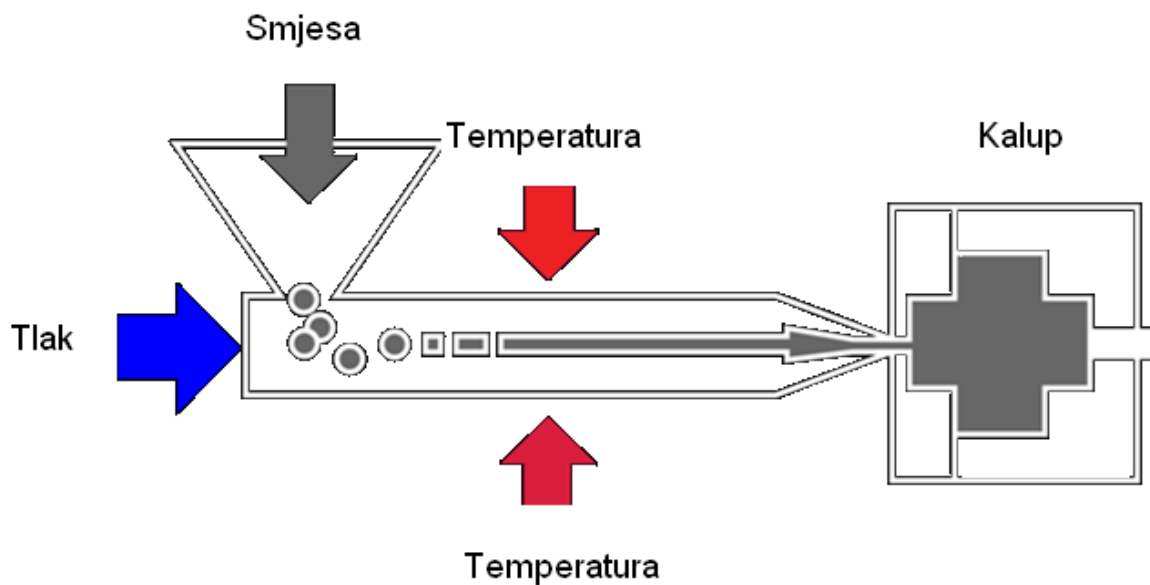
Postupak počinje predmiješanjem metalnog praha s organskim vezivom (plastomerna smjesa voska, polimera, ulja i maziva).

Granulirana smjesa se nakon miješanja ubrizgava u kalup tvoreći „zelenu“ komponentu (slika 5.5), a nakon prešanja se vezivo uklanja otapanjem i/ili zagrijavanjem.

Kvaliteta gotovog proizvoda ovisi o iskustvu, znanju djelatnika, o sirovini i kvaliteti alata (slika 5.6).



Slika 5.5. Zelena komponenta [16]

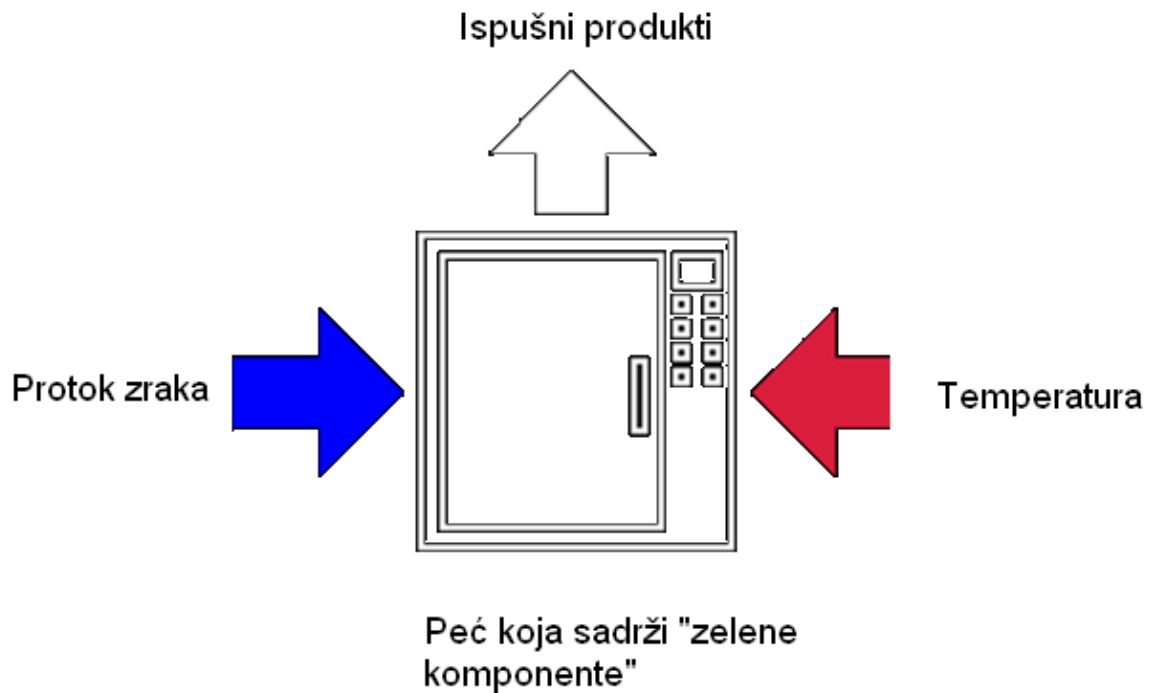


Slika 5.6. Postupak injekcijskog prešanja metalnih kompozita [16]

Prešana zelena komponenta se nalazi na niskoj temperaturi, zagrijavanjem u peći vezivo isparava te se na taj način uklanja i pretvara u „smeđu“ komponentu (slika 5.7).

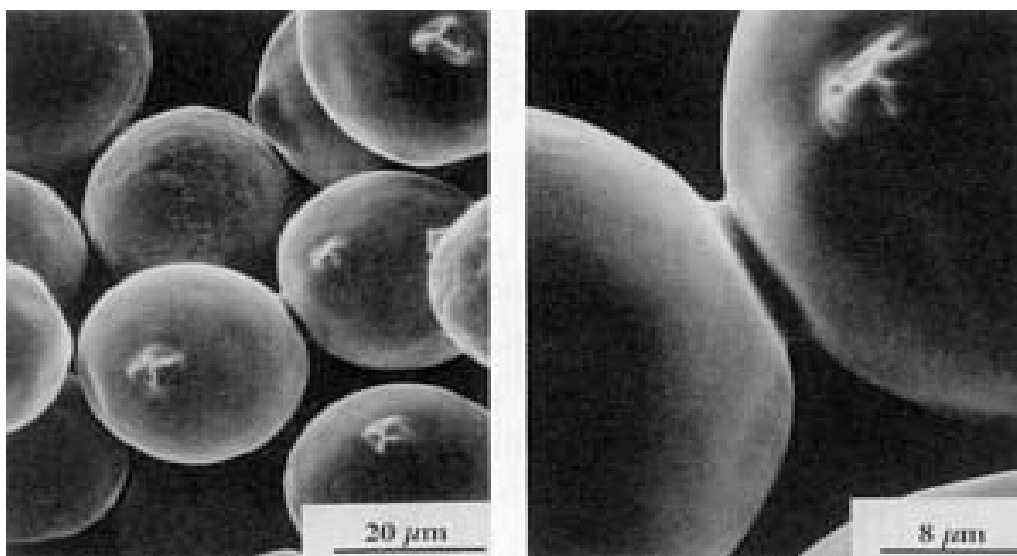


Slika 5.7. Smeđa komponenta [16]



Slika 5.8 Otapanje i/ili zagrijavanje [16]

Srašćivanje u kontroliranoj atmosferi je zadnja faza procesa koju postiže „smeđa“ komponenta. Srašćivanje je spajanje čestica pri visokoj temperaturi. Može uslijediti pri temperaturi ispod temperature tališta u čvrstom stanju difuzijom atoma, ali se u nekim stadijima srašćivanja može javiti i taljevina. Veza među česticama ostvaruje se stvaranjem "vrata" na mjestu kontakta;

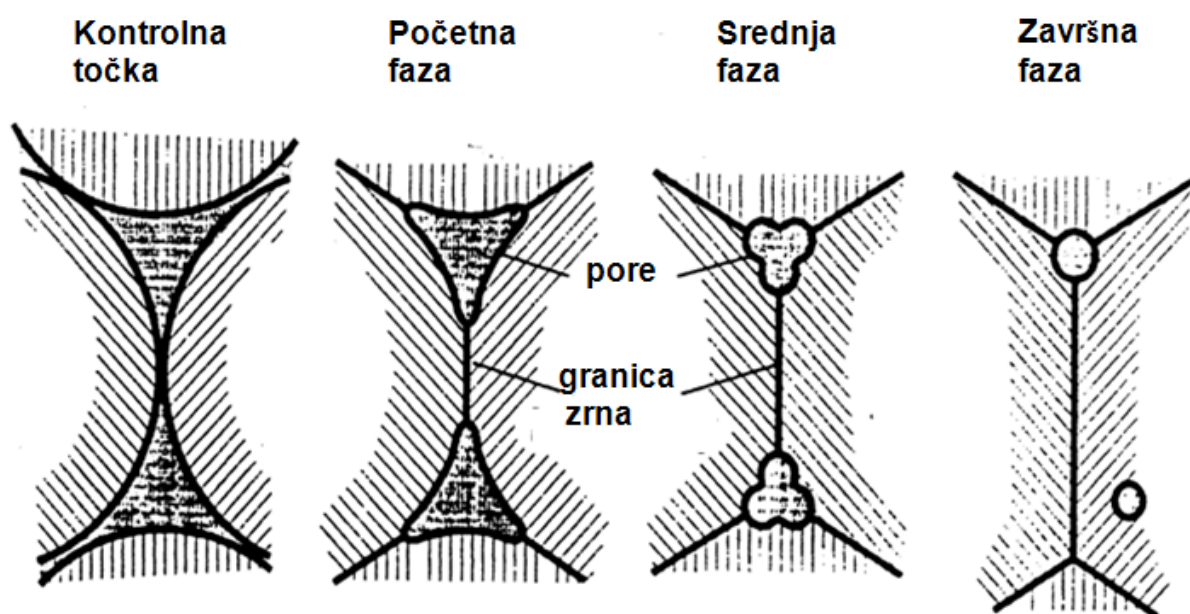


Slika 5.9. Srašćivanje [16]

Snimka stvaranja vrata srašćivanjem Ni-kuglica promjera 22 μm pri 1030°C u trajanju od 30 min. [15]

Čestice srašćuju kretanjem atoma koje smanjuju visoku površinsku energiju kuglica. Što su čestice manje, imaju višu površinsku energiju te srašćuju brže. Kod mehanizma srašćivanja način kretanja atoma je opće tečenje.

Za metalne praške to je difuzija atoma kroz površinu čestice na mjestu kontakta u drugu inter ili pak transkristalno. Budući da je difuzija toplinski aktivirani proces funkcija je temperature i vremena. Slika 5.10 prikazuje shematski različite faze procesa srašćivanja. S vremenom čestice srašćuju, udio pora se smanjuje te se oblikuju granice zrna.

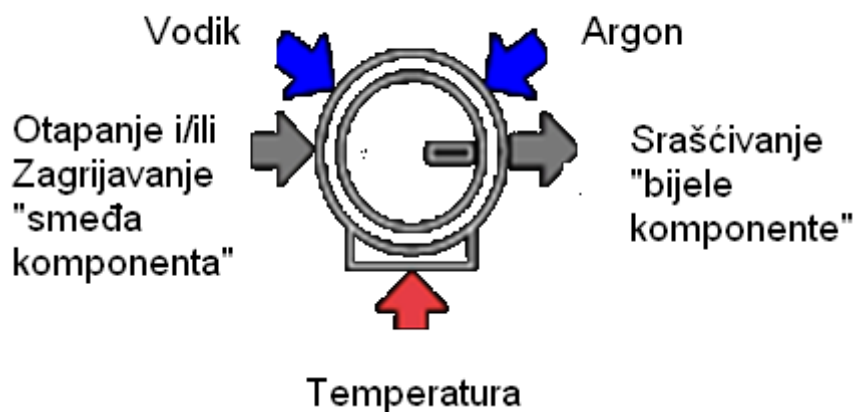


Slika 5.10. Faze procesa srašćivanja [12]

Kontrolirana ravnomjerna stezanja komponenti do 20% događaju se u završnoj fazi sve do njihove zadane veličine oblika i tolerancijskih parametara.

Nadalje, dijelovi mogu biti toplinski obrađeni, polirani, obloženi ili zavareni.

Iskustvo i pažnja stručnjaka na detalje omogućava proizvodnju kvalitetnih komponenata koje ne zahtijevaju skupe sekundarne operacije.



Slika 5.11. Naknadno srašćivanje [16]

Za MIM-postupak ne može se reći da ima najbolje rješenje u odnosu na druge proizvodne metode, ali nudi alternativni proizvodni put, kojim se daju rješenja za dijelove koji su u prošlosti bili vrlo teški i preskupi za proizvodnju.

MIM-postupak je najučinkovitiji za male, složene komponente u godišnjim količinama od 1000 i više (ako je dio posebno složen i skup, MIM bi još uvijek mogao biti isplativ za količine od 500 ili više).

Može biti korisno ako se dva ili više dijelova izrađuju odvojeno, a sklapaju u završnoj fazi.

Injekcijsko prešanje metala može omogućiti miješanje ili spajanje tih dijelova u jednu komponentu i tako smanjiti rizik grešaka, izbjeći gubitke uzrokovane sklapanjem i eliminirati skupe sekundarne operacije.

Dijelovi mogu sadržavati tekst, logotip ili serije kodova. Tim postupkom se postiže značajnije uštede u odnosu na postupke preciznog lijeva.

5.1 MIM materijali i njihova svojstva

Mnoštvo proizvoda je razvijeno MIM materijalima - željezo kao temelj, nikal i ugljik kao legirajući elementi.

- nelegirani i nisko legirani čelici:
- brzorezni čelici
- nehrđajući čelici
- nikal
- željezo
- bakar
- magnetske legure
- keramika.

Nadalje, mogu se koristiti materijali sa karakteristikama koje su superiornije u odnosu na standardne materijale ili one koje ne mogu biti obrađene korištenjem standardne tehnologije.

To su posebno :

- materijali postojani na habanje
- materijali postojani pri visokim temperaturama
- magnetski meki materijali.

Nudeći široku paletu materijala ovi proizvodi se razlikuju prema geometrijskoj slobodi konstruiranja, vrlo visokoj preciznosti i podobnosti na proizvodnju velikih količina.

Inženjeri svojim znanjem i iskustvom postižu razvoj novih materijala dokle god postoji izvor materijala (prahova) vode laboratorijska ispitivanja.

Uspoređuju gustoću i svojstva MIM dijelova sa svojstvima i gustoćom kovanih i lijevanih komponenata.

Na temelju njih vode računa o isplativosti ulaganja u procese izrade proizvoda MIM postupkom u odnosu na ostale postupke lijevanja i kovanja.

Tim postupkom nakon srašćivanja, u proizvodu zaostaje dio poroznosti. Međutim, ono što je ostalo poroznosti bit će fino i izolirano.

Čak i obrada odljevaka neće dati 100% gustoću dijelova jer će često biti uključaka, uglavnom u lijevanoj komponenti.

Općenito nakon srašćivanja, proizvedena komponenta zadane gustoće je u granicama od 95 do 98% zadane gustoće.

Da bi komponenta bila nepropusna za plin treba imati gustoću 91 do 92%.

5.2 Primjena MIM-a

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, smanjuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50% u odnosu na postupke kovanja čelika i postupke preciznog lijeva .

Kao rezultat tih prednosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardni postupak unutar broja industrijskih sektora uključujući:

- medicinu
- strojarstvo
- preciznu mehaniku
- svemirsku industriju
- automobilsku industriju
- telekomunikacije
- analizu plinova
- poljoprivredu
- instrumentaciju
- individualnih uređaja

5.3 Proizvodi MIM-a

Klizni zatvarač se koristi kao MIM komponenta, kao središnji element za sjedala u automobilima.



Slika 5.12. Klizni zatvarač [17]

Brave automobila, bravarske kapice ove MIM komponente koriste se u mnogim europskim vozilima. Kroz zadane attribute MIM materijal osigurava visoki stupanj sigurnosti protiv otvaranja na silu.



Slika 5.13. Brave automobila [17]

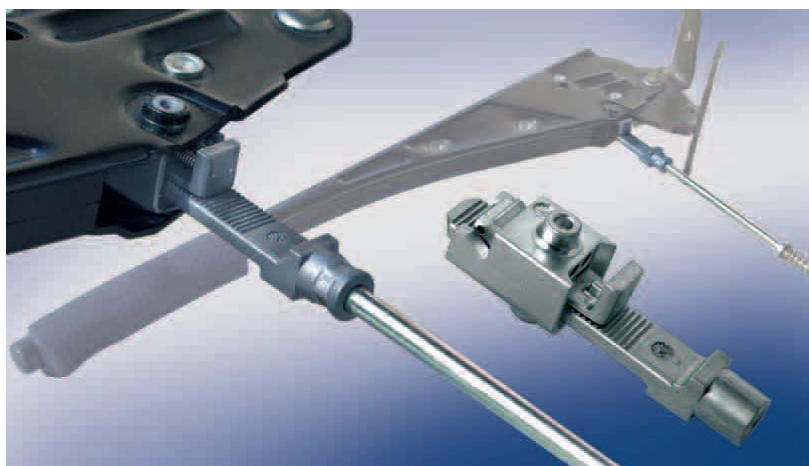
Senzor pritiska, kućište i poklopac - senzor kućište s poklopcem se odlikuje posebnim magnetski mekim atributima, što je moguće kroz korištenje posebno odabranih MIM materijala.



Slika 5.14. Senzor pritiska [17]

Rebalans ručna kočnica

Rebalans jedinica sastoji se od tri ručne MIM - komponente. MIM materijali se postižu odgovarajućom toplinskom obradom. Osiguravaju čvrstoću, širenje i tvrdoću u uskom i definiranom rasponu tolerancije i sposobnosti potrebnih za prijenos snage.



Slika 5.15. Rebalans ručna kočnica [17]

Cilindar za zaključavanje

MIM komponente imaju široku primjenu u proizvodnji brave.



Slika 5.16. Cilindar za zaključavanje [17]

Profilni zglobovi

Profilni zglobovi osiguravaju jednostavno i sigurno spajanje profila i mogu se rastaviti bez razaranja. To olakšava montažu, podešavanje i rastavljanje. Komponente su galvanski obložene zbog zaštite od korozije.



Slika 5.17. Profilni zglobovi [17]

Potražnja za MIM-om u medicinskoj je usluzi dodatno povećana od najnovijih smjernica koji je postavio Britanski institut za zdravlje i kliničku specijalnost.

Povećala se bolnička potražnja za jednokratnu upotrebu proizvoda.

U izvješću se navodi da instrumenti koji dolaze u kontakt sa rizičnim tkivima, neurokirurgija kao primjer, trebaju gdje je to moguće biti zamijenjeni sa alternativnim rješenjem za jednokratnu upotrebu.

Da bi se omogućila lakša promjena za odgovarajućom kvalitetom, proizvodi za jednokratnu upotrebu moraju biti visoke kvalitete i odgovarati geometriji postojećih instrumenata.

Preko 25% proizvoda što obuhvaća medicinska usluga proizvedeno je MIM postupkom, a posebno je istaknut u proizvodnji visoko kvalitetnih laparoskopskih komponenata za jednokratnu upotrebu.



Slika 5.18. Troakar za postavljanje katetera za peritonealnu dijalizu [18]

6. ZAKLJUČAK:

Upornim radom na MIM tehnologiji, pomiču se granice razvoja procesa i time se postiže uspješno napredovanje ispred konkurencije. Postignuta je lakša i jeftinija proizvodnja.

Detalji kao što su utori, zupci, unutarnje i vanjske oznake, tekstualni i grafički simboli mogu biti oblikovani u kalupu, eliminirajući potrebu za skupim sekundarnim operacijama.

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, smanjuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50% u odnosu na postupke preciznog lijeva.

Kao rezultat ovih pogodnosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardna tehnika unutar broja industrijskih sektora.

Tijekom posljednjih desetljeća MIM tehnologija (ubrizgavanje kompozita - praha sa rastopljenim vezivom) je postala pouzdana tehnologija za serijsku izradu metalnih i keramičkih komponenti složenih oblika.

Danas MIM industrija doživljava ekspanziju potiskujući konkurentske tehnologije i preuzimajući dio njihovog tržišta.

Za područje jugoistočne Europe je od posebnog interesa da usvoji ovu tehnologiju, a dosadašnje iskustvo i znanje iz srodnih oblasti omogućava relativno jednostavno usvajanje tehnologije injekcijskog prešanja metalnih kompozita (MIM) koje je našlo široku primenu u elektronici, avio-industriji, automobilske industriji, kemijske industriji, medicini itd.

Radi se o serijskoj proizvodnji kompleksnih metalnih komponenti malih dimenzija i složenih geometrija sa tolerancijama manjim od $\pm 0.3\%$. Ove komponente se odlikuju velikom čvrstoćom, mehaničkom snagom, otporne su na habanje, koroziju i starenje, stabilnih su dimenzija, visokih radnih temperatura.

7. LITERATURA

- [1] M.S.M. Alger: „Polymer Science Dictionary“, Elsevier Applied Science, Metal Matrix Composites, Advanced Materials & Processes 12/98, p. 19/23
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010.
- [2] D.A. McCoy, D.J.Lloyd: „Fabrication of graphite fibre reinforced aluminium, Canadian Aeronautics, and Space J.v 33,3/1987, p. 11-17.
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [3] V. Sundararajun: „Aluminium Composites In Aerospace Applications“, <http://home.att.net/~s.prasad/almmc.htm> 09.Lipanj.2010
- [4] M. Lima, D. Santos: „Metal Matrix Composites from Self-Propagating Synthesis and Hot Pressing, „European Microscopy and Analysis 9/2001, p. 29-31 <http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [5] ... “Reinforced Aluminium via the PRIMEX CASTTM Foundry Process“, www.msematerials.com/mmc.html, 2003, p. 1-3. 11. Lipnja.2010
- [6] D. Lewis, M. Singh, S.G Fishman: „In situ COMPOSITES“ , Advanced Materials&Processes 7/95. p. 29-31
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [7] A. W. Uquhart: „Molten Metals Sire MMCs, CMCs“, Advanced Materials&Processes 7/91, p. 25-29
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [8] ...Sprayforming of particle reinforced copper and aluminium composites“, <http://sfb372.iwt.uni-bremen.de/project-d2-eng.html>, 2002, p. 1-2.09. Lipnja.2010
- [9] „Rapid-solidification processing improves MMC properties“, Advanced Materials&Processes 11/90, p. 71-73
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010

- [10] M.E. Buck: „Advanced fibres for advanced composites“, Advanced Materials&Processes 9/87, p. 61-67
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [11] Ch.S. Rice, P.F Mendez: „Slurry - Based Semi – Solid DIE CASTING“, Advanced Materials&Processes 10/02. p. 49-52
<http://biblio.irb.hr/datoteka/189027.metalni.pdf> 09. Lipnja.2010
- [12] Novi materijali 2 predavanje Franz PM materijali i super legure
http://www.fsb.hr/NewsUpload/30_09_2006_5504_Novi_materijali_II_pre_davanje_Franz.ppt 08. Lipnja.2010
- [13] Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala
http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/pregled_razvoja_mat_hrv.pdf 28. Lipnja.2010
- [14] B. Berginc, M. Rot, Brizganje prašnatih materialov, *IRT* 3000, No. 9, pp.139-14,
<http://www2.etf.unssa.rs.ba/infoteh/rad/2009/E-I/E-I-20.doc> 05.Srpanj. 2010
- [15] F. Petzoldt, "Micro powder injection moulding – challenges and opportunities", *Powder Injection Moulding International*, Vol.2, No. 1, pp. 37-42, <http://www2.etf.unssa.rs.ba/infoteh/rad/2009/E-I/E-I-20.doc> 05.Srpanj.2010
- [16] EGIDE UK Specialist in Metal, Ceramic & Plastic Injection Moulding
http://www.egideuk.com/what_is_mim.php 17. Lipnja.2010
- [17] Powder metallurgical injection moulding MIM – Metal Injection Moulding
http://www.sintermetalltechnik.com/sixcms/media.php/1751/SST_MIM_en_gl.pdf 19. Lipnja.2010
- [18] Postavljanje katetera za peritonejsku dijalizu endoskopskim načinom
<http://zorancala.iz.hr/postavljanje.html> 28. Lipnja.2010

8. PRILOG

U prilogu su sadržane sljedeće slike:

Slika 4.1. Proizvodnja PM proizvoda po industrijskim granama u SAD & Kanadi 1995.
[12]

Tablica 4.1. Usporedba mogućnosti oblikovanja između MIM i preciznog lijeva [13]